

УДК 692.4:697.1:519.87

к.т.н., доц. **Олена Лялюк**

lyalyuk74@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6446-9244

аспірант **Євгеній Опря**,

eugenopria@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2660-4964

Вінницький національний технічний університет

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.185-196>

ОЦІНЮВАННЯ ФАКТОРІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПОКРИТТІВ БУДІВЕЛЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ ТА ІЄРАРХІЧНОЇ СТРУКТУРИ

Анотація. У статті розглянуто проблему підвищення енергоефективності покриттів будівель як одного з ключових елементів теплового балансу споруд в умовах сучасних нормативних вимог та енергетичних викликів. Проаналізовано обмеження традиційних методів оцінювання, що базуються на детермінованих підходах і не враховують невизначеність параметрів, експлуатаційні фактори та взаємозв'язки між ними. Обґрунтовано доцільність застосування методів нечіткої логіки та ієрархічного структурування для підвищення точності й гнучкості оцінювання. Запропоновано формалізований підхід до визначення показника енергоефективності покриття як функції конструктивних, теплофізичних, експлуатаційних і кліматичних параметрів. Розроблено ієрархічну модель факторів впливу та систему функцій належності, що дозволяє враховувати як кількісні, так і якісні показники. Запропонована методика забезпечує можливість комплексного аналізу в умовах неповноти та нечіткості даних, а також залучення експертних оцінок. Практична цінність дослідження полягає в можливості застосування моделі для вибирання оптимальних конструктивних рішень при проектуванні та термомодернізації будівель. Отримані результати сприяють підвищенню обґрунтованості управлінських рішень, енергетичній ефективності та стійкості будівельного сектору, зокрема в умовах сучасних економічних і кліматичних викликів.

Ключові слова: енергоефективність, покриття будівель, нечітка логіка, функції належності, ієрархічна класифікація, формалізування параметрів.

Вступ. Сучасні вимоги до енергозбереження в будівництві (згідно з Директивою ЄС 2018/844 та національними стандартами ДБН В.2.6-31:2021) роблять покриття будівель одним із ключових елементів теплового балансу споруди [1, 2]. Покриття (дах, фасадні системи) відповідають за 40–60 % тепловтрат або теплоприйняття залежно від кліматичної зони. Традиційні

методи оцінки (нормативний розрахунок за ISO 13790) не завжди враховують невизначеність параметрів, таких як реальна товщина утеплювача, експлуатаційні фактори чи вплив забруднення.

Для подолання цих обмежень пропонується формалізація параметрів, їх ієрархічна структуризація та застосування нечітких функцій належності. Це дає змогу перейти від чіткої до гнучкої багатокритеріальної оцінки.

Актуальність дослідження. В умовах глобальної енергетичної кризи, зміни клімату та зростання вартості енергоносіїв підвищення енергоефективності будівель є одним із пріоритетних напрямів державної політики більшості країн світу, зокрема України. Будівельний сектор відповідає за значну частину загального енергоспоживання (у Європі - близько 40 % кінцевого споживання енергії та 36 % викидів CO₂)[3]. Покриття будівель (дахи, покрівлі, плоскі та скатні конструкції) є однією з найвразливіших частин будівельної оболонки, через яку відбуваються суттєві тепловтрати - до 15–25 % загальних втрат тепла в будинку[4-6].

В Україні актуальність проблеми значно посилюється через наслідки повномасштабної війни: пошкодження енергетичної інфраструктури, масові блекаути, необхідність швидкого відновлення та будівництва нового житла й громадських споруд за принципами енергетичної стійкості та автономності.

Останні дослідження та публікації. Підвищенням енергоефективності будівель займалися вчені різних країн світу і це висвітлено в дослідженнях вітчизняних та закордонних публікаціях[7-21].

У роботі [7] був запропонований метод використання математичного моделювання енергетичної системи будівлі з урахуванням енергетичних, екологічних, енергетичних та економічних факторів. Метод розподіляє заходи на три групи: термомодернізація огорожувальних конструкцій, впровадження інтелектуальної системи управління, використання відновлювальних джерел енергії для виробництва тепла.

У роботі [8] досліджено вплив дахових садів на споживання енергії будівлею: зменшення потреб в енергії на охолодження на 30% протягом літнього дня, приблизно, зменшення потреби в енергії на опалення протягом зимового дня приблизно на 15%. Моделювальний аналіз з використанням комерційного програмного коду TRNSYS ще покращує енергоефективність на 19%.

У роботі [9] доведено, що застосування на даху прозорого теплоізоляційного скла з високоселективним світлопоглинальним покриттям та енергонакопичувальним шаром демонструє значний потенціал у зниженні споживання енергії будівлями на 43,9 %.

У роботі [10] пропонується швидке перетворення великої кількості відходів

пінополістиролу в охолоджувальне покриття за допомогою стратегії екстракції розчинником із замкнутим циклом, щоб задовольнити вимоги масштабу та чистоти виробництва охолоджувальної оболонки будівлі.

У дослідженні [11] числове моделювання та експериментальна оцінка, що полягають у модифікації наночастинок та підготовці порошкового покриття нанокompозиту, використовуються для вивчення впливу покритого поліуретанового нанокompозиту. Числові дослідження за допомогою програмного забезпечення Fluent показали, що тонкошарове нанокompозитне покриття зменшує споживання енергії на 4% та 13%.

У дослідженні [12] пропонується метод модернізації інформаційного моделювання будівлі з урахуванням мінімізації значення теплопередачі та мінімізації вартості модернізації. Метод інтегрує інструменти розробки BIM (наприклад, Autodesk Revit (R)), візуальні сценарії (наприклад, Dynamo) та недомінований генетичний алгоритм сортування (NSGA-II), налаштований у MATLAB (R).

У роботі [13] пропонується новий двошаровий інтегрований дах із матеріалів з фазовим переходом для покращення теплових характеристик. Теплові характеристики цього двошарового даху, що піддавався впливу навколишніх умов, потім були оцінені шляхом аналізу різних параметрів накопичення прихованої тепла, таких як температурні профілі, індекс теплової ефективності, теплове демпфування, коливання теплового потоку, теплоприплив, вирівнювання теплового навантаження, коефіцієнт зниження та економія викидів CO₂.

У статті [14] підкреслено, що більшість існуючих огорожувальних конструкцій будівель мають низький рівень ізоляції, високі теплові втрати через теплові містки та тріщини, відсутність належного сонячного контролю тощо. Проведено параметричне моделювання, яке охоплює використання розрахункових інструментів та показників ефективності на різних масштабах будівлі (оболонка-зона-будівля в цілому) з урахуванням реальних умов експлуатації, прийнятих для початкової каліброваної моделі.

Ефективним вирішенням проблеми визначення рівня енергоспоживання з використанням фізичних моделей процесів теплопередачі та математичних методів оптимізації організаційних і технологічних рішень займалися вчені в розглянутих роботах [15-19].

Комплексний аналіз наукових публікацій, у яких висвітлено результати досліджень впливу ключових параметрів на прогнозовану енергоефективність покриттів будівель, у тому числі з використанням сучасних методів математичного моделювання, демонструє значний прогрес у застосуванні дете-

рмінованих теплотехнічних розрахунків, імітаційного моделювання та нормативних підходів. Однак він одночасно вказує на відсутність вичерпних системних досліджень, спрямованих на створення комплексного математичного інструментарію оцінювання енергоефективності покриттів будівель, який би ефективно працював в умовах невизначеності, неповноти інформації та взаємного впливу численних кількісних і якісних факторів.

Проведений аналіз науково-методичних основ моделювання методів інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень за результатами прогнозування енергоефективності покриттів будівель виявив перспективність інтеграції функцій належності нечіткої логіки з ієрархічними структурами прийняття рішень. Такий підхід дозволяє формалізувати експертні знання, враховувати лінгвістичні змінні та забезпечувати гнучкість моделі в реальних умовах експлуатації.

Отримані висновки з аналізу літературних джерел дозволили чітко сформулювати мету та конкретні задачі подальших досліджень.

Мета дослідження - розробити підхід до оцінювання факторів енергоефективності покриттів будівель на основі функцій належності та ієрархічної структури, що дозволяє підвищити точність аналізу та обґрунтованість рішень при проєктуванні й модернізації будівель. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати наявні підходи до оцінювання енергоефективності покриття будівель;
- визначити основні параметри, що впливають на енергоефективність покрівельних конструкцій;
- здійснити формалізацію виявлених параметрів із урахуванням їх взаємозв'язків;
- розробити ієрархічну модель класифікації факторів впливу;
- побудувати функції належності для кількісної та якісної оцінки параметрів;
- обґрунтувати доцільність використання апарату нечіткої логіки для оцінювання енергоефективності.

Основна частина. Традиційні методи оцінювання факторів енергоефективності покриттів будівель (теплотехнічні розрахунки, нормативні показники опору теплопередачі за ДБН В.2.6-31) часто не враховують невизначеності та суб'єктивні фактори: неоднорідність матеріалів, вплив погодних умов, експлуатаційне старіння, взаємозв'язок різних параметрів (теплопровідність, відбивна здатність, маса, вартість, довговічність, екологічність). У таких умовах класичні кількісні методи стають недостатньо гнучкими.

Функції належності [20] нечіткої логіки та ієрархічна структура (на базі методу аналізу ієрархій) дозволяють ефективно працювати з невизначеністю, поєднувати кількісні та якісні показники, враховувати експертні оцінки та будувати багаторівневі моделі прийняття рішень [21].

Формалізація передбачає представлення задачі у вигляді математичної моделі:

$$E = f(X1, X2, X3, X4), \quad (1)$$

де E – показник енергоефективності покриття; $X1$ – конструктивні параметри впливу; $X2$ – теплофізичні параметри впливу; $X3$ – експлуатаційні параметри впливу; $X4$ – кліматичні параметри впливу.

Енергоефективність формалізуємо як функцію:

$$E = f(X) = \frac{K}{Q_{\text{втрат}} + Q_{\text{прийняття}}}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{втрат}}$ – річні тепловтрати, кВт·год/рік; $Q_{\text{прийняття}}$ – теплосприйняття від сонячної радіації, кВт·год/рік; K – коефіцієнт нормалізування (враховує кліматичну зону та нормативні вимоги), кВт·год/рік.

Для систематизування факторів пропонується ієрархічна структура, що передбачає три рівні:

- перший рівень – укрупнені групи факторів:
 - конструктивні ($X1$);
 - теплофізичні ($X2$);
 - експлуатаційні ($X3$);
 - кліматичні ($X4$);
- другий рівень – деталізування факторів:
 - конструктивні: товщина покриття ($x11$); тип матеріалу ($x12$); кількість шарів ($x13$).
 - Теплофізичні: коефіцієнт теплопровідності ($x21$); теплоємність ($x22$); паропроникність ($x23$).
 - Експлуатаційні: ступінь зношення ($x31$); наявність дефектів ($x32$); вологість ($x33$).
 - Кліматичні: сумарна сонячна радіація ($x41$); альbedo ($x42$); емісивність ($x43$).
- третій рівень – конкретні числові або лінгвістичні значення параметрів.

Загальна енергетична модель покриття за сезон:

$$Q = 24 \cdot x_{21} \cdot S \cdot d + x_{41} \cdot x_{42} \cdot S \cdot (1 - x_{43}), \quad (3)$$

де d – градусо-доби опалювального періоду, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{дб}$; S – площа покриття, м^2 .

Формалізування дозволяє подати задачу як багатовимірну оптимізаційну з обмеженнями. Ієрархічна структура взаємозв'язків між параметрами представлена у вигляді дерева логічного висновку (рис.1) і забезпечує системний підхід для оцінювання. Ієрархія дозволяє проводити парне порівняння на кожному рівні й обчислювати локальні та глобальні ваги.

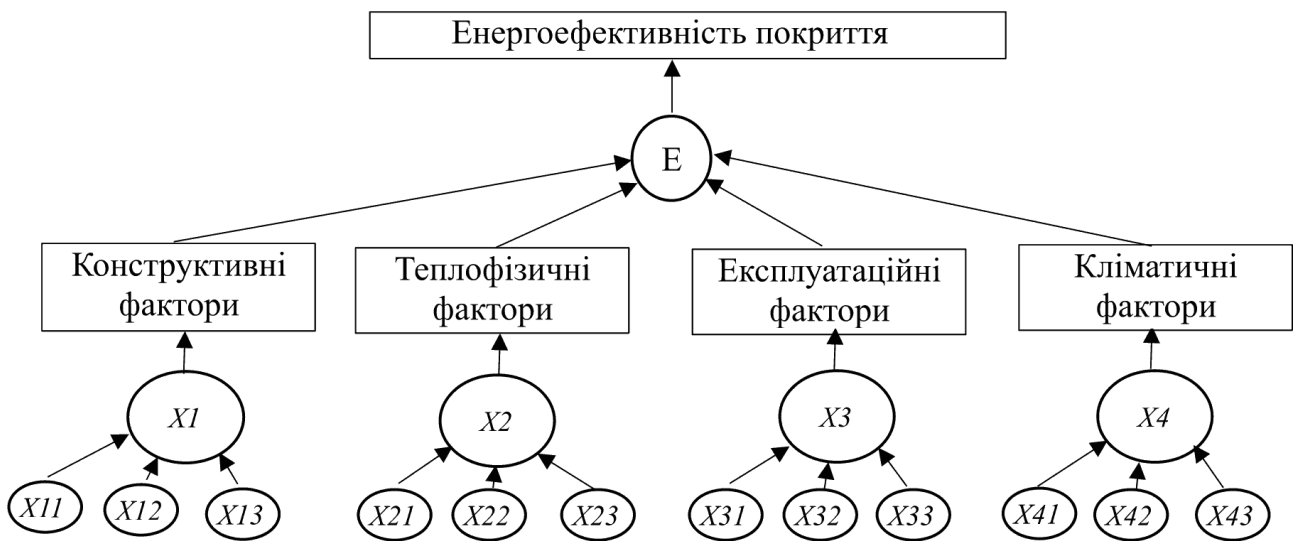


Рис. 1. Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків параметрів впливу на енергоефективність покриття будівель/

Оскільки параметри мають невизначеність (розкид вимірювань, суб'єктивність експертів, вплив зовнішніх факторів), застосовуємо теорію нечітких множин [20]. Для кожного параметра (X) вводимо лінгвістичні змінні: «низький вплив» (H), «середній вплив» (C), «високий вплив» (B) на енергоефективність.

Функції належності $\mu(x)$ будуємо як трикутні або трапецієподібні (найпоширеніші через простоту обчислень). Приклад наведений для коефіцієнта теплопередачі (x_{21}) – чим менше (x_{21}), тим вища енергоефективність:

$$\mu_B(x_{21}) = \begin{cases} 1, & x_{21} \leq 0,15, \\ \frac{0,25 - x_{21}}{0,1}, & 0,15 < x_{21} \leq 0,25, \\ 0, & x_{21} > 0,25; \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_C(x_{21}) = \begin{cases} 0, & x_{21} \leq 0,15 \cup x_{21} \leq 0,40, \\ \frac{x_{21} - 0,15}{0,1}, & 0,15 < x_{21} \leq 0,25, \\ \frac{0,4 - x_{21}}{0,15}, & 0,25 < x_{21} \leq 0,4; \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_H(x_{21}) = \begin{cases} 0, & x_{21} \leq 0,25, \\ \frac{x_{21} - 0,25}{0,1}, & 0,25 < x_{21} \leq 0,4, \\ 1, & x_{21} > 0,4. \end{cases} \quad (6)$$

Для альbedo x_{42} (чим вище, тим краще) - трапецієподібна функція належності з ядром (0,7 ; 0,8):

$$\mu_B = \max \left(\min \left(\frac{x_{42} - 0,6}{0,2}, \frac{0,9 - x_{42}}{0,1} \right), 0 \right) \quad (7)$$

Аналогічно будують функції для решти параметрів.

Операції нечіткої логіки реалізовано на основі узагальненого механізму нечіткого логічного висновку між лінгвістичними змінними. Апроксимацію залежності (1) виконано із застосуванням системи нечітких правил типу «ЯКЩО–ТО»:

$$\begin{aligned} \mu_H(E) = & \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \\ & \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_H(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \vee \\ & \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_H(X_4) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(E) = & \mu_C(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \\ & \vee \mu_H(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_C(X_4) \vee \\ & \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_H(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(E) = & \mu_B(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \vee \\ & \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_C(X_2) \wedge \mu_B(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \vee \\ & \vee \mu_B(X_1) \wedge \mu_B(X_2) \wedge \mu_C(X_3) \wedge \mu_B(X_4) \end{aligned} \quad (10)$$

Результативна функція належності $\mu(E)$ дефазифікується центром тяжіння, тобто переходить від нечіткого результату до кількісного значення:

$$E = (X_1, X_2, X_3, X_4) = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} E_{d_i} \cdot \mu_{d_i}(E)}{\sum_{i=1}^{\ell} \mu_{d_i}(E)}, \quad (11)$$

де ℓ – кількість нечітких термів для оцінювання змінної E ; d_i – назва i -го терму; $\mu_{d_i}(E)$ – ступінь належності E до терма d_i .

Методологія комплексного оцінювання енергоефективності покриття складається з таких етапів:

1. Збирання даних та нормалізування параметрів;
2. Побудова ієрархії та визначення ваг;
3. Обчислення функцій належності для кожного фактора впливу X_i ;
4. Дефазифікація;
5. Ранжування варіантів покриття.

На основі прикладу: для покриття з $x_{21} = 0,18$, $x_{42} = 0,75$, $x_{43} = 0,85$ результатна належність до «високої енергоефективності» становить 0,82 (добре). Метод дозволяє порівнювати варіанти навіть за неповних даних.

Висновки. Розроблена методика оцінювання факторів енергоефективності покриттів будівель з використанням функцій належності та ієрархічної структури дозволить об'єктивно обирати оптимальні типи покриттів під час нового будівництва та термомодернізації, враховувати українські кліматичні, економічні та воєнні реалії, сприяти досягненню цілей енергетичної незалежності, декарбонізації та сталого розвитку будівельного сектору України відповідно до європейських стандартів. Розроблений формалізований підхід до оцінювання енергоефективності покриттів будівель враховує багатофакторність системи, дозволяє працювати з нечіткими даними, забезпечує більш гнучке прийняття рішень. Запропонована модель може бути використана при енергоаудиті та проектуванні.

References

1. Teplova izolyatsiya ta enerhoefektyvnist budivel. DBN V.2.6 – 31:2021. [Chynnyu vid z 2022-09-01]. https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3876000386489779420 (in Ukrainian).
2. Fedonyuk S. V. Enerhetychna polityka Yevropeys'koho Soyuzu. Volyn. nats.

- un-t im. Lesi Ukrayinky, 2022.
<https://evnuir.vnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/dac23014-b0e8-4095-b8bf-17d3480c12f8/content> (in Ukrainian).
3. Zelena transformatsiya Ukrayiny . <https://greentransform.org.ua/yes-onovyv-dyrektyvu-pro-energoefektyvnist-budivel/> Accessed 21 March 2026. (in Ukrainian).
 4. Dudar I. N., Lyalyuk O. H., Oprya YE. M., Lyalyuk A. O. "Otsinka stanu orhanizatsiyno-tekhnologichnykh rishen u sferi oblashtuvannya, ekspluatatsiyi ta termomodernizatsii pokryttiv." *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, Vol. 37, No. 2, 2024. pp. 181–192. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-181-192> (in Ukrainian)
 5. Lialiuk L., Oprya Y., Lialiuk A. "Optimization of thermal modernization technologies for building coverings to improve energy efficiency and thermal insulation properties". In *Proceedings of VI International scientific and practical conference Future of Science: Innovations and Perspectives. April 21-23, 2025, Stockholm, Sweden*, pp. 119–123. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/04/FUTURE-OF-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PERSPECTIVES-21-23.04.25.pdf>
 6. Lyalyuk O. H., Lyalyuk A. O., Oprya Ye. M. "Udoskonalennya teploizolyatsiynykh vlastyvostrych enerhozberihayuchoho pokryttya budivli". In *Mizhnar. nauk.-prakt. internet-konf. Molod' v nauksi: doslidzhennya, problemy, perspektyvy. VNTU. Vinnytsya. 2025.* <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/schedConf/presentations?track=948> (in Ukrainian).
 7. Polyvianchuk A., Malyarenko V., Kapustenko P., Polyvianchuk N., Petruk H, Arsenyeva O. "Estimation of energy, economic and environmental efficiency for renovation of building heating system". *Clean Techn Environ Policy*, Vol. 27, 2025, pp. 8797–8812. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03150-8>
 8. Penalvo-Lopez E., Cárcel-Carrasco J., Alfonso-Solar D., Valencia-Salazar I. Hurtado-Pérez E. "Study of the Improvement on Energy Efficiency for a Building in the Mediterranean Area by the Installation of a Green Roof System", *Energies*, Vol. 13., Iss. 5., 2020, p. 1246, <https://doi.org/10.3390/en13051246>.
 9. Peng L., Xu Z., Chao L., Zheng D., Yang H., Sun C., Cui H. "New energy-saving building developed by using polyethylene glycol/halloysite nanotube energy-storage blanket and heat-insulating glass with $\text{Na}_x\text{WO}_3@/\text{SiO}_2$ nano-coating." *Solar energy materials and solar cells*. Vol. 250, 2022, p. 112074. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112074>.
 10. Feng S., Yao, L., Feng, M., Cai H., He X., He M., Bu X., Zhou Y., Zhang T.

- “Sustainable regeneration of waste polystyrene foam as cooling coating: Building cooling energy saving, CO₂ emission reduction and cost-benefit prospective.” *Journal of cleaner production*, Vol. 434, 2024. pp. 140361. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140361>.
11. Azemati A., Kolor SSR., Khorasanizadeh H., Sheikhzadeh G., Hadavand, BS., Eldessouki M. “Thermal evaluation of a room coated by thin urethane nanocomposite layer coating for energy-saving efficiency in building applications.” *Case studies thermal engineering*. Vol. 43, 2023, p. 102688. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102688>
12. Seghier TE, Lim Y-W, Harun MF, Ahmad MH, Samah AA, Majid HA. "BIM-based retrofit method (RBIM) for building envelope thermal performance optimization". *Energy and Buildings*, Vol. 256, 2022, p. 111693 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111693>
13. Huluka, AB, Muthulingam S. "Enhancing building roof thermal energy efficiency in hot climates: A novel dual-layer design with integrated phase change materials." *Energy and buildings*. Vol. 347, Part B, 2025, p. 116331. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116331>
14. Aste N., Leonforte F., Manfren M., Mazzon, M. "Thermal inertia and energy efficiency - Parametric simulation assessment on a calibrated case study." *Applied Energy*, Vol. 145, 2015, pp. 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.084>
15. Ouyang, Jianjun; Ju, Peng, "The choice of energy saving modes for an energy-intensive manufacturer under non-coordination and coordination scenarios." *Energy*, Vol. 126, p. 733-745. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.059>
16. Wang, Qiankun; Huang, Qian. “Research on the Technical and Economic Evaluation Model of Energy-saving Buildings.” *Advanced Materials Research*. Vol. 529, 2012, P. 424-430. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.529.424>
17. K. -C. Chiu, C. -L. Chen, H. -F. Lin and Y. -H. Wu, "Which Is the Priority for the Public while Adopting Energy-saving Facilities? An Analysis of Association between Acceptance and Attitudes toward Using Energy-saving Facilities," In *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Macao, China, 2019, pp. 1506-1511 <https://doi.org/10.1109/IEEM44572.2019.8978939>
18. Li, Gang; Zhang, Qingpu; Feng, Zhengqian. "Research on method for calculating energy saving in data centre." *Oxidation communication*, Vol. 39, Iss. 2A, 2016. P. 1962-1973. <https://scibulcom.net/en/article/saglQtmRlilw3s7XnNWK>

19. Luo, Jia Luo, Jia. Study of Building Energy-Saving Based on TRIZ. *Advanced Material Research*, 2012, Vol. 442, pp. 58-61, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.442.58>
20. Mityushkin YU.I., Mokin B.I., Rotshteyn O.P. "Soft Computing: identyfikatsiia zakonornosti nechitkymy bazamy znan." Monohrafiia. Vinnytsia: UNIVERSUM – Vinnytsya. 2002. 145 s. <http://mokin.com.ua/science/monograph/b9.html> (in Ukrainian)
21. Goepel K. "Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS)". *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10, No. 3, 2018, pp. 469-487, <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
22. Sadollah, Ali. "Introductory Chapter: Which Membership Function is Appropriate in Fuzzy System?" In *Fuzzy Logic Based in Optimization Methods and Control Systems and Its Applications*, InTech, 31 Oct. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79552>

UDC 622.741.3.022+622.7+620.133

PhD, Assoc. Prof. **Olena Lialiuk**

lyalyuk74@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6446-9244,

Post-Graduate **Yevgen Opria**,

Eugenopria@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2660-4964

Vinnitsa National Technical University

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.185-196>

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY FACTORS OF BUILDING COATINGS USING MEMBERSHIP FUNCTIONS AND HIERARCHICAL STRUCTURE

Abstract. *The article considers the problem of increasing the energy efficiency of building coatings as one of the key elements of the formation of the thermal balance of structures in the conditions of modern energy conservation requirements. Existing approaches to assessing energy efficiency, in particular normative and deterministic methods, are analyzed, and their limitations associated with the failure to take into account the uncertainty of parameters and the mutual influence of factors are identified. The feasibility of using an approach based on the formalization of parameters, their hierarchical structuring and the use of fuzzy logic membership functions is substantiated. A mathematical model for assessing the energy efficiency of coatings as a function of a set of structural, thermophysical, operational and climatic factors is proposed. A hierarchical structure of indicators is developed,*


which allows systematizing the parameters of influence and determining their significance using multilevel analysis. The use of fuzzy sets makes it possible to take into account both quantitative and qualitative characteristics, as well as work with incomplete and inaccurate data. The proposed approach integrates expert assessments and formalized calculation procedures, which increases the objectivity of the results obtained. Additionally, the influence of external operating conditions and the variability of input parameters are taken into account, which ensures the adaptability of the model to different climatic zones and types of buildings. The proposed methodology provides increased accuracy in assessing the energy efficiency of coatings, expands the possibilities of making informed decisions in the design and thermal modernization processes of buildings. The practical significance of the approach lies in the possibility of its application in energy audits, digital modeling and decision support systems. The methodology can be integrated into modern BIM technologies and used to optimize design solutions at different stages of the building life cycle. The proposed results contribute to achieving the goals of energy independence, decarbonization and sustainable development of the construction sector of Ukraine in the conditions of post-war recovery.

Keywords: *energy efficiency, building coverage, fuzzy logic, membership functions, hierarchical classification, parameter formalization.*

Received/Надійшла до редакції 14.04.2026

Accepted/Прийнято 19.05.2026

Issued/Опубліковано 29.05.2026

 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:

Creative Commons Attribution 4.0 International License